

УДК 626.8:631.6:532.5:004.9

<https://doi.org/10.31713/vt2202527>

Новачок О. М. [1; ORCID ID: 0000-0001-6958-2473],

К.С.-Г.Н., доцент

Новачок І. О. [1; ORCID ID: 0009-0006-0957-3472],

здобувач

ДИНАМІКА СТАНДАРТИЗОВАНОГО ІНДЕКСУ ЕВАПОТРАНСПІРАЦІЇ ОПАДІВ (SPEI) ДЛЯ м. РІВНОГО ЗА 1973–2024 РОКИ

Проблеми, пов'язані з водою, вважаються одними з найбільш серйозних проблем, що стоять перед людством в нинішньому столітті. Гідроінформатика пропонує значні можливості вирішити деякі з цих проблем, шляхом інтеграції баз даних, моделей і підтримки прийняття рішень. У цій статті досліджено динаміку стандартизованого індексу евапотранспірації опадів (SPEI) для м. Рівного за період 1973–2024 років. Використано бази даних температури повітря та кількості опадів, а також методи гідроінформатики, зокрема мову програмування R. Аналіз змін показав тенденції до підвищення температур та зменшення рівня опадів, що впливає на забезпечення водними ресурсами сільського господарства та функціонування гідромеліоративних систем.

Ключові слова: гідроінформатика; бази даних; стандартизований індекс евапотранспірації опадів (SPEI); кліматичні зміни; евапотранспірація; водний баланс; посухи.

Вступ. Кліматичні зміни суттєво впливають на водний баланс регіонів, зокрема через зміну кількості опадів та підвищення температури. Одним із показників оцінки водного режиму є стандартизований індекс евапотранспірації опадів (SPEI) [1; 5], який враховує як опади, так і температурні зміни. Дослідження динаміки SPEI є важливим для управління водними ресурсами та розробки адаптаційних заходів у сільському господарстві.

Гідроінформатика – це дисципліна та технологія, що стосується використання досягнень у галузі інформаційно-комунікаційних технологій, комп'ютерних наук та штучного інтелекту для вирішення проблем водного середовища [2].

Метою гідроінформатики є перетворення соціального середовища з пасивного, (в якому кожна зацікавлена сторона реагує індивідуально на чисто технічну трансформацію і виключно на основі безпосередніх соціальних наслідків для цієї зацікавленої сторони) в інтерактивну (в якій кожен учасник взаємодіє з іншими зацікавленими сторонами в рамках спільноти, в результаті чого різні



зацікавлені сторони приходять до співпраці та формування трансформації в цілому, перетворення її в по суті соціотехнічну трансформацію) [2].

Стандартизований індекс евапотранспірації опадів (SPEI)

В останні десятиріччя проблема збільшення кількості посушливих явищ стоїть дуже гостро в багатьох країнах світу. Посуха є достатньо складним природним явищем, яке обумовлене довгим і значним дефіцитом опадів при підвищеній температурі повітря, внаслідок чого вичерпуються запаси вологи в ґрунті за рахунок випаровування і транспірації. Для оцінки посушливих явищ широко використовується стандартизований індекс опадів або (SPI), який може бути розрахований для будь-якого пункту за допомогою тривалого ряду спостережень за опадами і ґрунтується на понятті стандартизованих опадів. Під стандартизованими опадами розуміють відхилення їх величини для певного періоду часу від середньої багаторічної величини, поділене на середньоквадратичне відхилення, тобто використовуються нормовані величини. Далі цей індекс було модифіковано залученням поняття про потенціальне сумарне випаровування PE, після чого розрахований індекс дістав назву стандартизований індекс евапотранспірації опадів або (SPEI) [5].

Розрахунок PE є складним і потребує багатьох параметрів, таких як температура поверхні ґрунту, вологість повітря, сонячна радіація, яка надходить до ґрунту, тиск водяної пари, потоки тепла між ґрунтом та атмосферою тощо. З метою залучення PE до визначення індексів посухи можна використовувати простіший підхід і це не позначиться істотно на розрахованих індексах. Було запропоновано для розрахунку потенційного випаровування, яке позначене як PE (у мм), застосувати метод Торнтвейта [3], за яким PE визначається залежно від середньомісячної температури повітря, а саме

$$ET = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^m, \quad (1)$$

де T – середньомісячна температура повітря, °C; I – індекс теплоти, який розраховується як сума 12 середньомісячних величин індексу i , а останній одержується з середньомісячних температур повітря наступним чином

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}, \quad (2)$$

де m – коефіцієнт, $m = 6.75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1.79 \cdot 10^{-2} I + 0.492$;
 K – поправочний коефіцієнт, що визначається як функція широти та календарного місяця

$$K = \left(\frac{N}{12}\right) \left(\frac{NDM}{30}\right), \quad (3)$$

де NDM – кількість днів у місяці; N – максимальна кількість сонячних годин, яка визначається за такою формулою

$$N = \frac{24}{\pi} \overline{\omega}_S, \quad (4)$$

$\overline{\omega}_S$ – годинний кут сходу сонця, який обчислюється за виразом

$$\overline{\omega}_S = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta), \quad (5)$$

φ – широта у радіанах; δ – сонячне схилення у радіанах, розраховане, як

$$\delta = 0.4093 \cdot \sin\left(\frac{2\pi J}{365} - 1.405\right), \quad (6)$$

J – середній юліанський день місяця.

Після того, як одержані дані про потенційне сумарне випаровування, для кожного i -го місяця розраховуються різниці (D) між опадами та PE

$$D_i = P_i - PE_i, \quad (7)$$

які характеризують надлишок або дефіцит вологи для певного місяця.

Розраховані величини D і для визначення SPEI підсумовуються на різних часових масштабах за такою процедурою. Різниця D і k , j для даного місяця j та року i залежить від обраного часового масштабу k . Наприклад, накопичена різниця для одного місяця у певний рік i з 12-місячним часовим масштабом розраховується за допомогою виразу

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=13-k+j}^{12} D_{i-1,l} + \sum_{l=1}^j D_{i,l}, j < k; X_{i,j}^k = \sum_{l=j-k+1}^j D_{i,l}, j \geq k, \quad (8)$$

де D , i , l – різниця $P - PE$ у перший місяць року i , виражена у міліметрах.

Для ймовірнісного опису SPEI в різних часових масштабах використовується трипараметричний гама-розподіл ймовірностей. У



трипараметричному розподілі досліджувана величина x може приймати значення в діапазоні ($\gamma > x < \infty$), де γ є параметром вихідного розподілу. Для стандартизації рядів D використовують лог-логістичний розподіл.

Функція щільності ймовірностей трипараметричного лог-логістичного розподілу представляється як

$$f(X) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{X - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{X - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2}, \quad (9)$$

де α , β і γ показники масштабу, форми і походження, відповідно, для значень ряду D в діапазоні ($\gamma > D < \infty$).

Параметри лог-логістичного розподілу можуть бути отримані за допомогою різних підходів. У зарубіжній практиці широко використовується метод L-моментів. L-моменти аналогічні звичайним центральним моментам, але вони можуть характеризувати широкий спектр функцій розподілу і є більш надійними по відношенню до обліку викидів в даних.

Вибіркові оцінки L-моментів по ряду D отримують, використовуючи формули

$$\lambda_1 = \omega_0; \quad (10)$$

$$\lambda_2 = \omega_0 - 2\omega_1; \quad (11)$$

$$\lambda_3 = \omega_0 - 6\omega_1 + 6\omega_2; \quad (12)$$

$$\lambda_4 = \omega_0 - 12\omega_1 + 30\omega_2 - 20\omega_3 \quad (13)$$

Ймовірісно-зважені моменти порядку S розраховуються як

$$\omega_S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^S D_i, \quad (14)$$

де F_i – оцінка частоти, знайдена методом Хоскінга:

$$F_i = \frac{i - 0.35}{N}, \quad (15)$$

де i – номер елемента D і в ряді спостережень, розташованого в зростаючому порядку; N – число точок даних.

Коли L-моменти розраховані, параметри розподілу можуть бути отримані таким чином

$$\beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2}; \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)}; \quad (17)$$

$$\gamma = \omega_0 - \alpha \Gamma\left(\frac{1+l}{\beta}\right)\Gamma\left(\frac{1-l}{\beta}\right); \quad (18)$$

де $\Gamma(\beta)$ є гама-функцією β .

Інтегральну функцію розподілу ряду D , згідно з лог-логістичним розподілом, отримують з рівняння

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1}. \quad (19)$$

Індекси $SPEI$ розраховуються з використанням методу, який представлено в роботі

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3}, \quad (20)$$

де

$$W = \sqrt{-2 \ln(P)}, \quad (21)$$

при $P < 0.5$, P – забезпеченість значень ряду D , де $P = 1 - F(x)$.

Якщо $P > 0.5$, то цей параметр замінюють на $(1-P)$ і знак результуючого $SPEI$ змінюється на зворотний. Константи мають такі значення:

$$C_0=2,515517, C_1=0,802853, C_2=0,010328, d_1=1,432788, d_2=0,189269, d_3=0,001308.$$

Середнє значення $SPEI$ дорівнює нулю, а стандартне відхилення 1. $SPEI$ є стандартизованою змінною, і він може порівнюватися з іншими значеннями $SPEI$ у часі і просторі.

Установлена класифікація посух залежно від значення, яке прийняла величина $SPEI$ (таблиця).

Таблиця

Класифікація значень $SPEI$

Значення $SPEI$	Категорія періоду	Категорія посухи
1	2	3
$SPEI \geq 2.00$	Вкрай вологий	
$1.50 \leq SPEI \leq 1.99$	Дуже вологий	
$1.00 \leq SPEI \leq 1.49$	Помірно вологий	



продовження таблиці

$0 \leq \text{SPEI} \leq 0.99$	Близький до нормального	
$0 \geq \text{SPEI} \geq -0.99$	Близький до нормального	Слабка посуха
$-1.00 \geq \text{SPEI} \geq -1.49$	Помірно сухий	Помірна посуха
$-1.50 \geq \text{SPEI} \geq -1.99$	Дуже сухий	Інтенсивна посуха
$\text{SPEI} \leq -2.00$	Вкрай сухий	Екстремальна посуха

R – мова програмування і середовище вільного програмного забезпечення для статистичних обчислень і графіки, що підтримуються R Foundation for Statistical Computing [4; 6]. Мова R широко використовується для статистики та інтелектуального аналізу даних, для розробки статистичного програмного забезпечення. Опитування, дослідження інтелектуального аналізу даних і дослідження літератури наукових баз даних показують значне збільшення популярності в останні роки. Станом на червень 2025 р. R посідає 14 місце в індексі TIOBE (міра популярності мов програмування).

Можливості R розширюються через створювані користувачем пакети, які дозволяють спеціалізовані статистичні методи, графічні пристрої, можливості імпорту та експорту, інструменти звітності. Ці пакети розробляються в основному в R, а іноді і в Java, C, C++ і Fortran.

Основний набір пакетів включено при встановленні R, з більш ніж 21000 додаткових пакетів (станом на жовтень 2024), доступних у Всеохопній мережі архівів Comprehensive R Archive Network (CRAN), Bioconductor, Omegahat, GitHub та інших.

Сторінка «Task Views» на вебсайті CRAN перелічує широкий спектр завдань для яких доступні пакети R (у таких галузях, як фінанси, генетика, високопродуктивні обчислення, машинне навчання, медичні зображення, соціальні науки та просторова статистика). R також був визначений FDA як придатний для інтерпретації даних клінічних досліджень.

Інші ресурси R-пакета включають Crantastic, сайт спільноти для оцінки та перегляду всіх CRAN-пакетів, R-Forge, центральну платформу для спільної розробки пакетів R, R-програм і проєктів. У R-Forge також розміщено багато неопублікованих бета-пакунків, а також розробки версій пакетів CRAN.

Методика дослідження

Для розрахунку у файл «Rivne_SPEI.csv» були зібрані дані за 623 місяці з січня 1973 по грудень 2024 роки, тобто $623 \cdot 6 = 3738$ значень:

PRCP – щомісячна кількість опадів, у мм;

TMAX – максимальна середньодобова температура за місяць, у °C;

TMIN – мінімальна середньодобова температура за місяць, у °C;

TMED – середньомісячна температура, у °C;

AWND – середньомісячна швидкість вітру, у км/год;

ACSH – середньомісячна хмарність, у %.

Розрахунок здійснено у середовищі R з використанням пакетів readr, dplyr, lubridate, hydroTSM, SPEI, ggplot2.

```
# Аналіз SPEI для м. Рівного 1973–2024 рр.
```

```
# Підключення пакетів
```

```
library(readr)
```

```
library(dplyr)
```

```
library(lubridate)
```

```
library(hydroTSM)
```

```
library(SPEI)
```

```
library(ggplot2)
```

```
# Завантаження даних
```

```
setwd("/media/nom/E/Math/SPEI")
```

```
df <- read_csv("Rivne_SPEI.csv")
```

```
plot(df)
```

```
# • Перетворення дат у формат R (Date)
```

```
df <- df %>%
```

```
  mutate(Date = ymd(paste(YEAR, MONTH, 15)))
```

```
# Розрахунок PET за Thornthwaite
```

```
df$PET <- thornthwaite(df$TMED, lat = 50.62)
```

```
# Розрахунок кліматичного водного балансу
```

SPEI-12 для м. Рівне

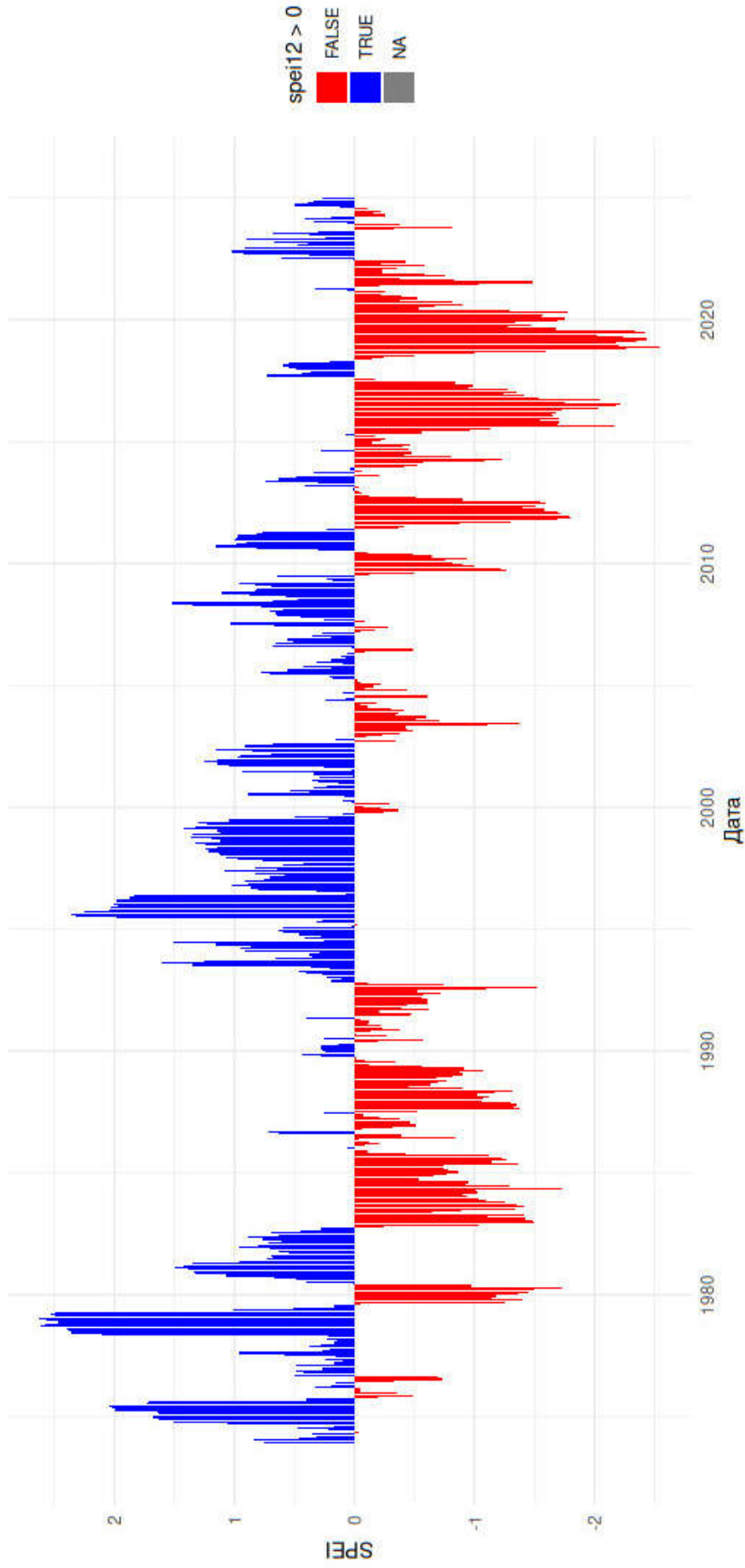


Рисунок. Динаміка стандартизованого індексу евапотранспірації опадів (SPEI) для м. Рівного за 1973–2024 роки

```
df$BAL <- df$PRCP - df$PET

# Розрахунок SPEI на масштабі 12 місяців
df$spei12 <- spei(df$BAL, scale = 12)$fitted

# Візуалізація SPEI
ggplot(df, aes(x = Date, y = spei12, fill = spei12 > 0)) +
  geom_col() +
  scale_fill_manual(values = c("red", "blue")) +
  labs(title = "SPEI-12 для м. Рівне", y = "SPEI", x = "Дата") +
  theme_minimal()
```

Висновок. Аналіз SPEI для м. Рівного за 1973–2024 роки виявив значні кліматичні зміни, зокрема посилення посушливих періодів. Застосування відкритих джерел даних та автоматизованих інструментів в середовищі R дозволяє швидко та ефективно оцінювати водний баланс, що є критичним для планування сталого водокористування.

1. Vicente-Serrano S. M., Beguería S., & López-Moreno J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23(7). P. 1696–1718. 2. Abbott M. B. *Hydroinformatics: Information Technology and the Aquatic Environment*; Ashgate (later Avebury): Aldershot, UK; Brookfield, VT, USA, 1991. 3. Thornthwaite C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. 1948. 4. Gutiérrez J. M. et al. Climate data analysis with R. *Environmental Modelling & Software*. 2014. 5. Vicente-Serrano S. M., Beguería S., López-Moreno J. I. SPEI: A drought index for climate impact assessment. *Earth Interactions*. 2010. 6. Сайт розробників мови програмування R, програмного середовища для статистичних обчислень, аналізу та представлення даних в графічному вигляді. URL: <https://cran.r-project.org/> (дата звернення: 25.02.2025).

REFERENCES:

1. Vicente-Serrano S. M., Beguería S., & López-Moreno J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23(7). P. 1696–1718. 2. Abbott M. B. *Hydroinformatics: Information Technology and the Aquatic Environment*; Ashgate (later Avebury): Aldershot, UK; Brookfield, VT, USA, 1991. 3. Thornthwaite C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. 1948. 4. Gutiérrez J. M. et al. Climate data analysis with R. *Environmental Modelling & Software*. 2014. 5. Vicente-Serrano S. M., Beguería S., López-Moreno J. I. SPEI: A drought index for climate impact assessment. *Earth Interactions*. 2010. 6. Сайт розробників мови програмування R, програмного середовища для статистичних обчислень, аналізу та представлення



danykh v hrafichnomu vyhliadi. URL: <https://cran.r-project.org/> (data zvernennia: 25.02.2025).

Novachok O. M. [1; ORCID ID: 0000-0001-6958-2473],

Candidate of Agricultural Sciences (Ph.D.), Associate Professor

Novachok I. O. [1; ORCID ID: 0009-0006-0957-3472],

Applicant

¹*National University of Water and Environmental Engineering, Rivne*

DYNAMICS OF THE STANDARDIZED PRECIPITATION EVAPOTRANSPIRATION INDEX (SPEI) FOR THE CITY OF RIVNE FOR THE YEARS 1973–2024

Water-related problems are considered to be among the most serious challenges facing humanity in this century. Climate change is significantly affecting the water balance of regions, in particular through changes in precipitation and temperature increases. Due to excessive consumption, pollution of aquifers, inadequate waste management, lack of high-quality water collection and distribution technology, and excessive agriculture, the availability of water in the world is decreasing. Despite the fact that our technological capabilities to combat hydrometeorological phenomena have advanced rapidly over the past hundred years, such events are becoming increasingly catastrophic. Hydroinformatics offers significant opportunities to solve some of these problems by integrating databases, models, and decision support.

The problem of increasing the number of droughts is very acute in many countries of the world. Drought is a rather complex natural phenomenon, which is caused by a long and significant deficit of precipitation at elevated air temperatures, as a result of which moisture reserves in the soil are depleted due to evaporation and transpiration.

To assess drought phenomena, the standardized precipitation index or (SPI) is widely used, which can be calculated for any point using a long series of precipitation observations and is based on the concept of standardized precipitation. Standardized precipitation is understood as the deviation of its value for a certain period of time from the average multi-year value, divided by the root mean square deviation, i.e. normalized values are used. This index was further modified by involving the concept of potential total evaporation PE, after which the calculated index was called the standardized precipitation evapotranspiration index or (SPEI).

This article examines the dynamics of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) for the city of Rivne for the period 1973–2024. Air temperature and precipitation databases were used, as well as

hydroinformatics methods, in particular the R programming language. Analysis of changes showed trends towards increasing temperatures and decreasing precipitation levels, which affects the provision of water resources to agriculture and the functioning of hydro-reclamation systems.

Keywords: hydroinformatics; databases; standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); climate change; evapotranspiration; water balance; droughts.

Отримано: 07 травня 2025 року
Прорецензовано: 02 червня 2025 року
Прийнято до друку: 16 червня 2025 року